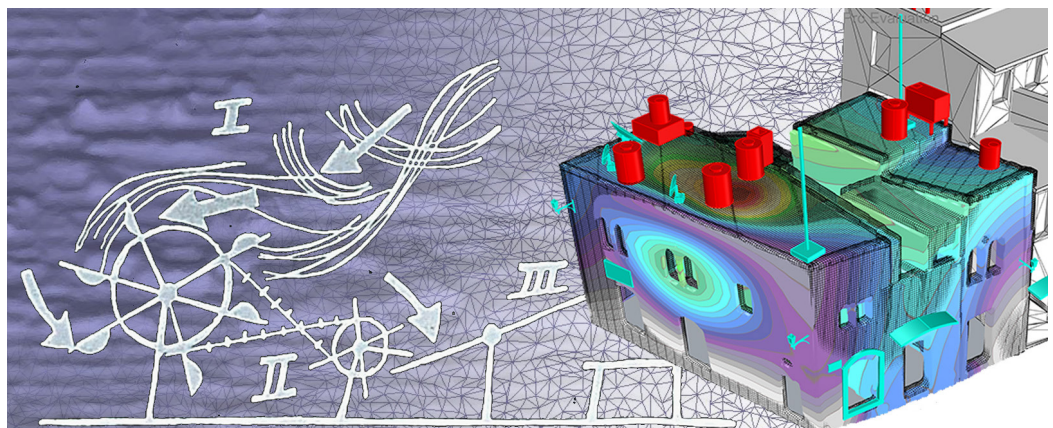
La Forma strutturale: opportunità di articolazione topologica delle *mesh* geometriche al processo di conoscenza e simulazione in Architettura

Raffaella De Marco

Abstract

L'adozione di modelli *reality-based* affidabili per l'analisi e la simulazione strutturale affronta un dibattito scientifico tran-settoriale. La necessità di corrispondenza numerica tra forma e meccanica richiesta dalla Scienza delle Costruzioni, prevalentemente orientata verso la sintesi formale, trova un dibattuto terreno di confronto con la Scienza del Disegno e le sue pratiche digitali.
Al centro, il tema della forma e l'adattamento di condizioni di *geometry processing* alla morfologia dell'architettura, per specificare l'associazione di significati numerici, statico-meccanici e di simulazione. Un processo che evidenzia la gestione del modulo *mesh* come unità geometrica semplice, al contempo discreta e continua, adattabile ad articolazioni fluide e relazioni parametrico-informative.
Sia semioticamente che tecnologicamente, la grafica digitale permette sperimentazioni sui dati geometrici delle strutture che intrecciano segno e parametro in aggiornate definizioni visuali dei linguaggi del disegno. Oltre ad una potenziata aderenza tra forma reale e struttura virtuale, si afferma il controllo delle unità del disegno in termini algoritmici, rafforzando la genesi reciproca tra rappresentazione e computazione. Attraverso sperimentazioni condotte su casi studio internazionali che contemplano l'*Historical Built Heritage*, vengono analizzati i processi di controllo del modello strutturale *mesh* 3D. Le specifiche variabili adattive di tali modelli sono confrontate a vantaggio di una garanzia di affidabilità e collaudo dei prototipi digitali, orientando il linguaggio della rappresentazione per applicazioni interdisciplinari.

Parole chiave
Disegno strutturale, morfologia digitale, *geometry processing*, modelli *mesh*, simulazione strutturale

Topic
Simulare

Meccanica e struttura rappresentate attraverso "agenti" di forma. "Schizzo" di Paul Klee (Fonte: Web), ed elaborazione di sollecitazione statica nel modello 3D di un *hosh* tradizionale del centro storico di Betlemme (Fonte: R. De Marco).

doi.org/10.3280/oa-832-c146

Struttura e Forma: un'introduzione all'esperienza grafica

La rappresentazione delle strutture in architettura [1], storicamente influenzata dal connubio di Scienza e Tecnica [2], inquadra un'applicazione delle pratiche del Disegno ben orientata verso esigenze di indagine quantitativa della forma, inerenti al mondo della meccanica. Un obiettivo di analisi proiettato oltre la statica del sistema morfologico, che richiede un metodo per integrare i modelli grafici con le proprietà sia fisico-materiche che temporali utili alla simulazione dinamica sulle tensioni strutturali. L'interpretazione della struttura architettonica come sistema meccanico ha incrementato una logica rappresentativa per istances [3], quali componenti e vincoli, per facilitarne la connessione fisica delle parti e l'interpretazione delle variabili. I modelli strutturali hanno subito un'astrazione di forma, spesso perdendo la riconoscibilità dal sistema reale verso una rigorosa, ma irrealistica, schematizzazione in aste e blocchi ideali (fig. 01). Tale processo non trova però fondamento negli sviluppi conseguiti dalla ricerca nel campo del rilievo digitale, sempre più affinato per garantire, in modo non invasivo, gradi di risoluzione e densità di misurazione elevate. Proprio il rapporto tra Realtà ed Astrazione è alla base di una trattazione di metodi e prodotti per l'analisi strutturale, concettualmente sbilanciati sull'idealizzazione formale degli apparati architettonici. Alla spontaneità di schizzi e schemi figurativi legati alle istruzioni costruttive e di cantiere, una regolarizzazione geometrica del Disegno strutturale è stata introdotta "a priori" dell'esperienza fenomenica. L'esaltazione di proporzioni e regolarità, con la categorizzazione di moduli formali predeterminati, ha impostato un'estetica razionale assoluta nella rappresentazione meccanica, rafforzando la diffusione di codici grafici e manuali per una prevalente tassonomia signica del disegno strutturale.

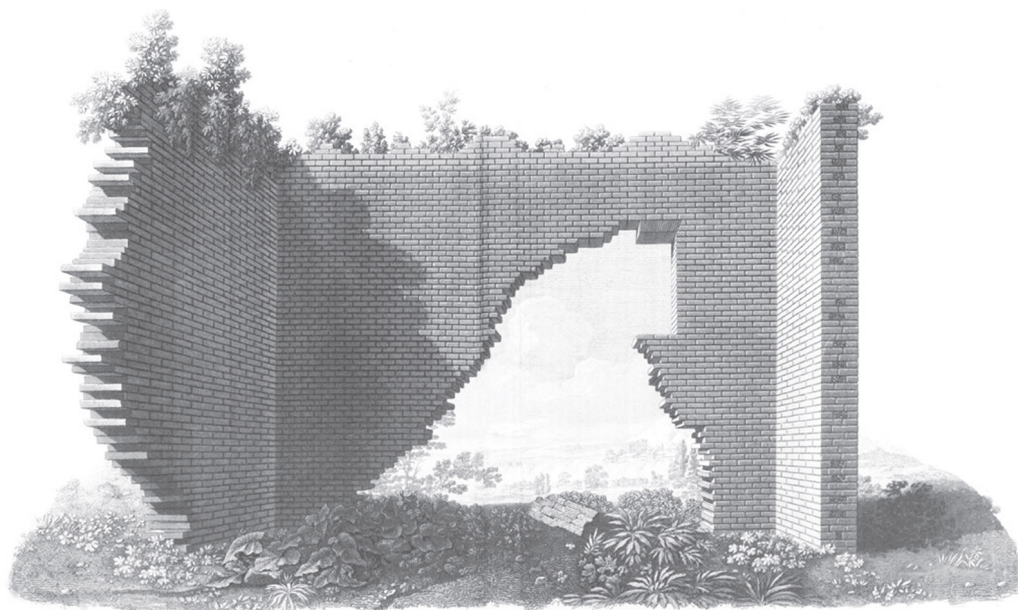



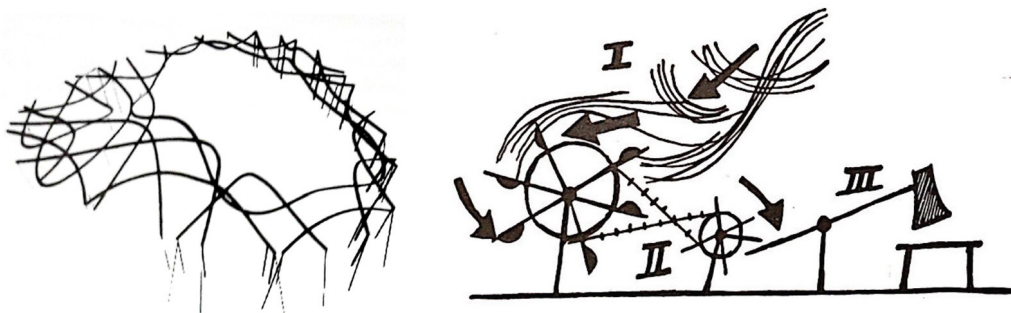
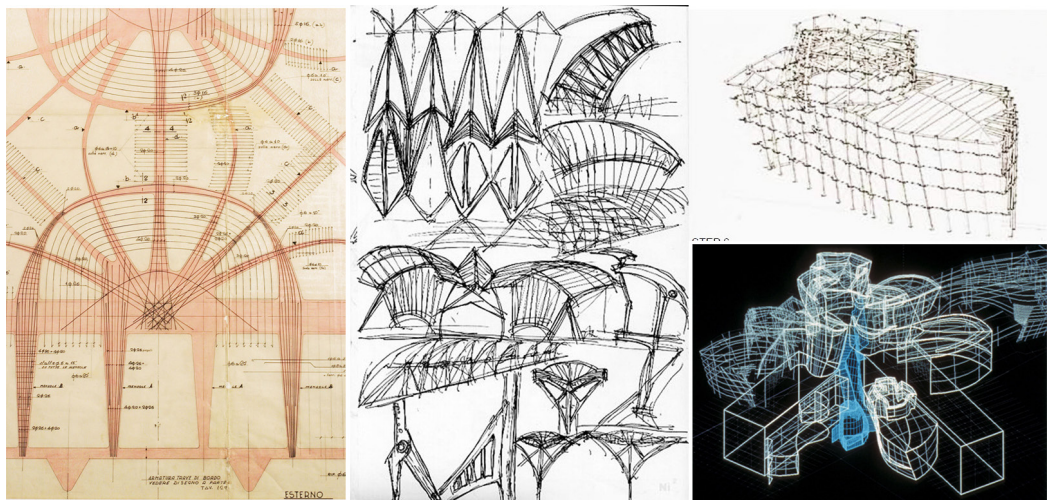
Fig. 01. Livelli di interpretazione e manipolazione per una definizione visuale dell'opera strutturale. Dall'alto: Jean-Baptiste Rondelet, variazione formale che conserva la continuità delle tensioni, dal Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir, 1802; Ove Arup, "Actar Arquitectura – Telecommunications Tower on the Turò de la Rovira, diagramma strutturale, Barcellona, 2001; Paul Klee, "Schizzo", funzioni meccaniche e degli organi della struttura di un mulino ad aria, 1930. (Fonte: Web).

Le strutture riprodotte sono state condotte ad apparati scheletrici, "scarni" di specificità formale, omessi della complessa, ma reale, imperfezione morfologica quale identità statica del sistema. La cognizione visuale della struttura architettonica ha consolidato l'idea di matrici sistematiche, utili al processo edilizio, estremizzate rispetto ai codici tradizionali ereditati dalle accademie e dal disegno d'ornato (figg. 02, 03). Una rinuncia ai caratteri di dettaglio del disegno che ha disposto l'assunzione del ruolo grafico a componenti vettoriali e primitive per la sintesi della forma: la "linea", elemento direzionale e costitutivo, ed il "punto", vincolo connettivo e di articolazione biunivoca. Tale semplificazione formale si è ben disposta al Disegno Digitale nell'assecondare il *processing* di sistemi computazionali, quali i codici di calcolo agli Elementi Finiti. Questo a scapito di una forzatura delle potenzialità della Rappresentazione, del rilievo digitale e dei dettagliati *database* da acquisizione *close-range*, su processi di semplificazione che appaiono dunque iconici, quasi signici (fig. 04).

Fig. 02. Variabili visuali per il controllo dell'elaborazione signica dell'immagine di J. Bertin (dimensione, valore, texture, colore, orientamento e forma), e parallelismo di applicazione nella rappresentazione tra la figura umana e l'opera strutturale. (Fonte: Web).

Fig. 03. Astrazione nel disegno strutturale, dallo schizzo tecnico alla pratica digitale. Da sinistra: Pier Luigi Nervi, dettagli di studio per strutture complesse, 1950; Santiago Calatrava (2001); Frank Gehry, studio progettuale del Guggenheim Museum 3D sul software CATIA, 1997. (Fonte: Web).

Una forma "semplice" come principio topologico per la rappresentazione strutturale

Il concetto di Forma, applicato alla documentazione delle strutture storiche in architettura, concentra l'attitudine del Disegno sulla proprietà mnemonica della materia che sottende l'analisi del sistema meccanico. Si richiama così il processo percettivo, di ricezione e comunicazione del messaggio grafico, alla base dell'intera disciplina della Rappresentazione, che qui intercorre tra l'osservazione diretta della condizione statica, attraverso la misura e il rilievo, e la sua comunicazione ai fini dell'interpretazione fenomenica. Alla Forma subentrano molteplici possibili accezioni [4], ciascuna volta a catturare una specifica coerenza dell'approccio grafico alla declinazione del duplicato strutturale. La Forma strutturale è assunta come "progettuale", di riferimento rispetto al suo condizionamento "plastico-dinamico" dovuto a schemi di sollecitazione.

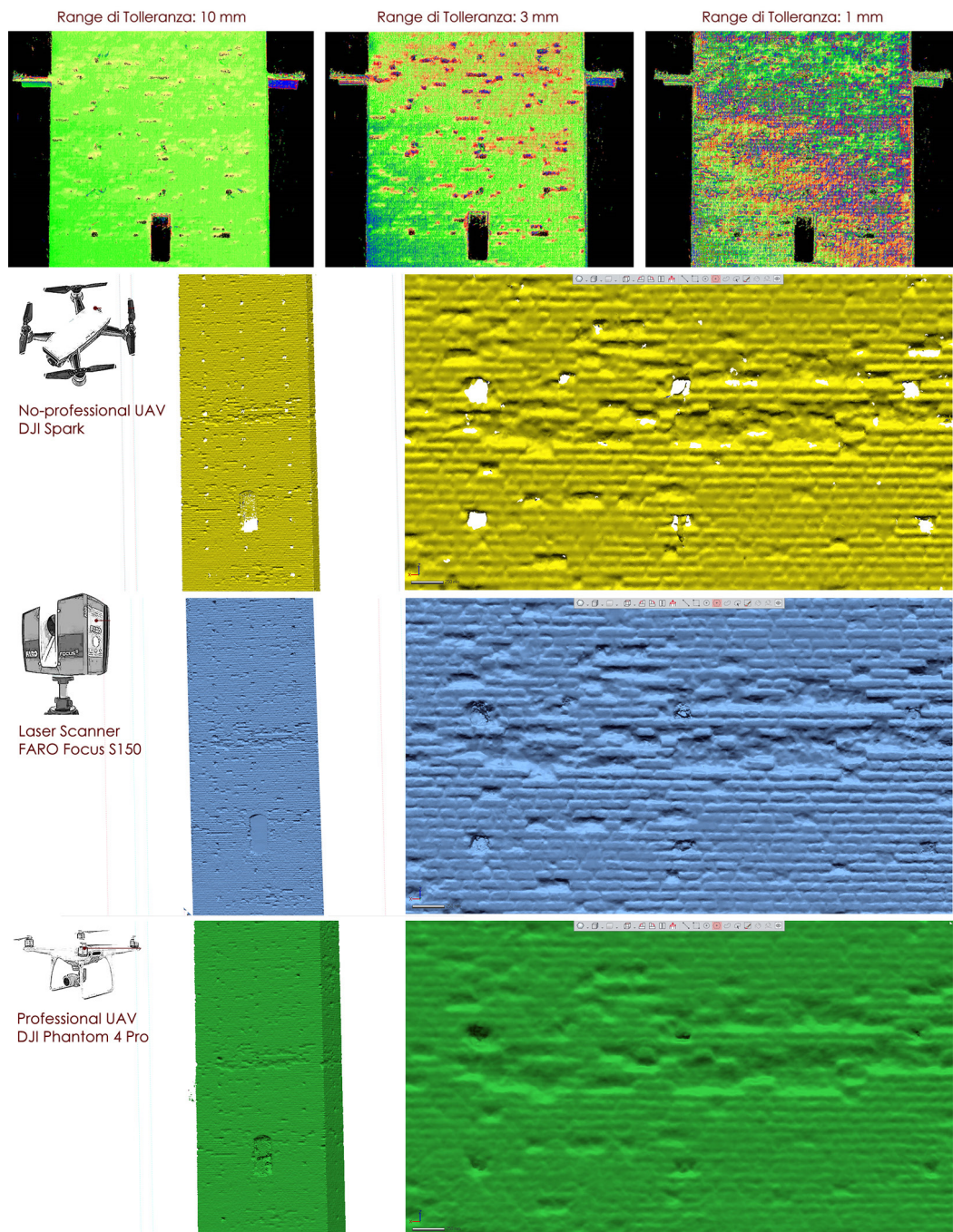



Fig. 04. Comparazione di qualità e dettaglio morfologico delle *mesh reality-based* 3D nell'acquisizione da rilievo multi-strumentale *close-range*. Caso studio del rilievo per la documentazione non invasiva della Torre medievale dell'Orologio presso l'Università di Pavia. (Fonte: R. De Marco)

Al contempo, essa diviene "istantaneo-consecutiva" come rapportata ad un atto di acquisizione in una configurazione temporanea nell'esperienza dell'opera, e "diretta-indiretta" rispetto ai protocolli di indagine e processing dell'osservazione in sito e del rilevamento strumentale close-range. In riferimento alle modalità di trasposizione grafica, la Forma strutturale è dichiarata come "parziale" o "totale", per le condizioni di segmentazione e gerarchizzazione delle componenti della struttura "disegno" rispetto al sistema "reale". Parallelamente, essa può essere definita "libera" o "concatenata", per le relazioni di continuità spaziale, superficiale e al contorno alle quali può essere forzata (o al contrario, liberata) nel ricalcare le condizioni strutturali materiche e di vincolo. A collettore di tali molteplicità, si rafforza la necessità di una manipolazione e gestione gerarchica della Forma strutturale per figure "semplici", riducendo le variabili visuali [5] per concentrare l'appor-

to di significato meccanico ed introdurre altre dimensioni di parametri e informazione (fig. 05). Le componenti geometriche poligonali, delimitate da *nodes* e *edges*, si dimostrano compatibili sia all'associazione numerico-meccanica, sia alle basi algoritmiche che sottendono gli strumenti della Rappresentazione Digitale 3D. *Mesh grids, patches, faces* e *bourders* istituiscono un aggiornato lessico del prodotto visuale, dove il disegnatore può mantenere una cognizione morfologica precisa sia dei singoli moduli topologici, che del sistema unitario significativo: la struttura architettonica digitale. In tal modo, si impedisce che la densità di informazioni grafiche si presenti come un agglomerato di frammenti, dove i particolari perdano significato e l'unità diventi irriconoscibile (fig. 06). Lo stesso sistema si offre a condizioni meccaniche sequenziali e consecutive al contorno: agendo sulla caratterizzazione spaziale dei singoli poligoni e della maglia nel complesso, la dimensione fisica è simulata temporalmente, agendo sulle qualità morfologiche del disegno 3D, fluidificando la leggibilità di condizioni statiche simulate e la gestione di informazioni associate. A tal fronte, proprio la pratica digitale facilita la gestione di una simile pluralità di condizioni meccaniche sulla medesima entità grafica, connettendo e ordinando in termini analitici le geometrie strutturali nella programmazione dello spazio virtuale (fig. 07).
La semplicità della Forma è fondata sulla corrispondenza tra modulo e *pattern* nella costruzione del modello 3D, per manipolare la continuità superficiale (o solida) ad assumere nella struttura virtuale condizioni significative. In tal senso, la ricerca topologica sulla modellazione 3D con *mesh* diviene tassonomica per le sperimentazioni di Rappresentazione strutturale e la conservazione dell'imperfezione formale, a sua volta, diviene un'esigenza epistemologica per applicare processi affidabili di simulazione meccanica sull'architettura (fig. 08).

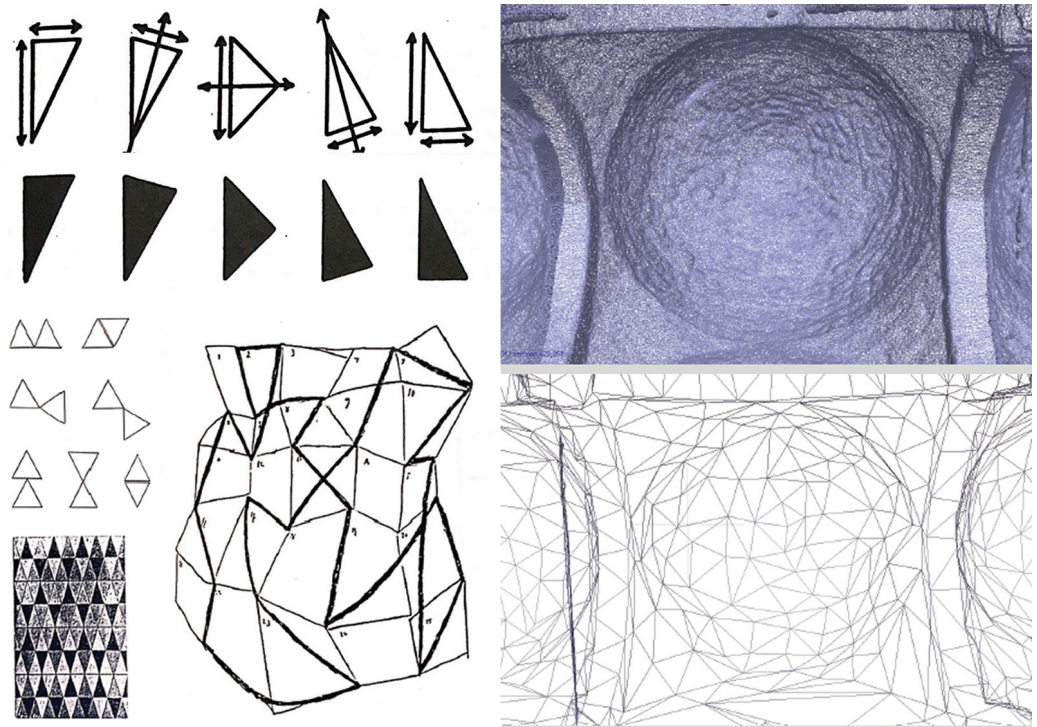



Fig. 05. Dall'applicazione di moduli poly allo sviluppo di reticolati complessi, fino alla calibrazione di densità poligonale per geometry processing applicato alla modellazione automatica mesh di geometrie strutturali. Caso studio della documentazione fotogrammetrica per il restauro presso la Moschea di Al-Jazzar ad Acri, Israele. (Fonte: R. De Marco).

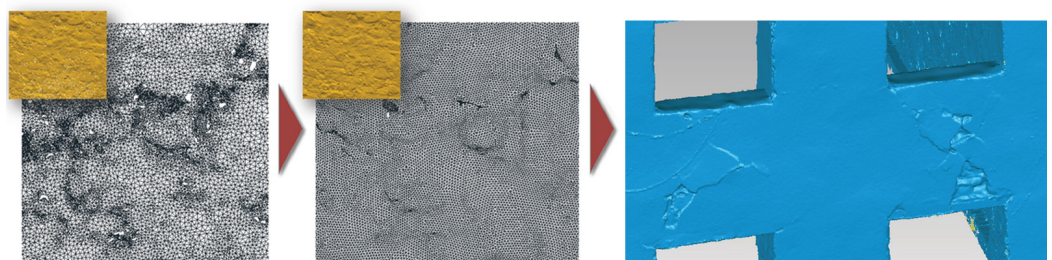



Fig. 06. Densità e ordine della maglia nella definizione del dettaglio morfologico per la superficie strutturale. Caso studio del monitoraggio sismico su prototipo edilizio sperimentale del centro storico di Basilea, Svizzera, realizzato presso il laboratorio di Fondazione EUCENTRE, Pavia. (Fonte: R. De Marco).

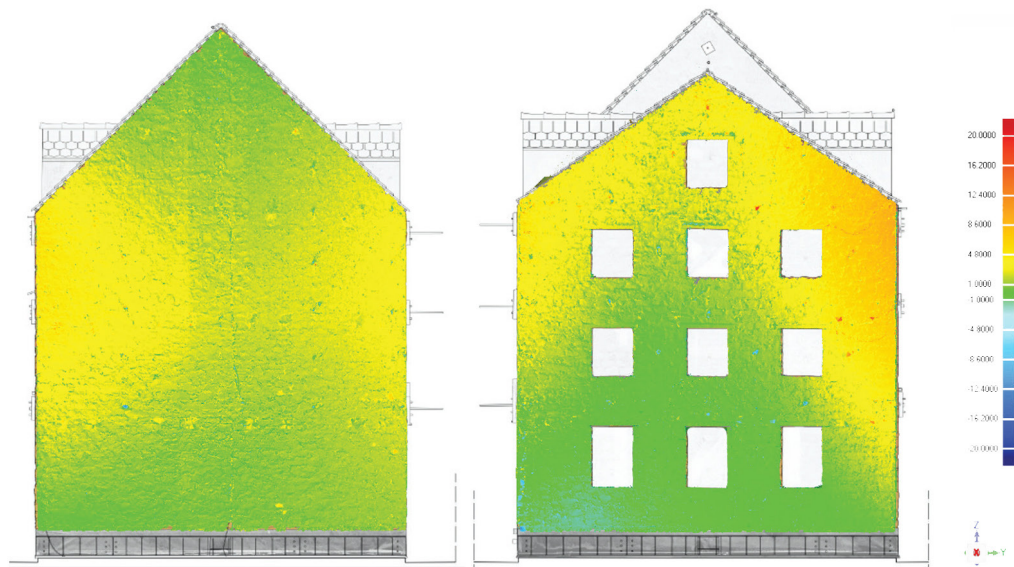
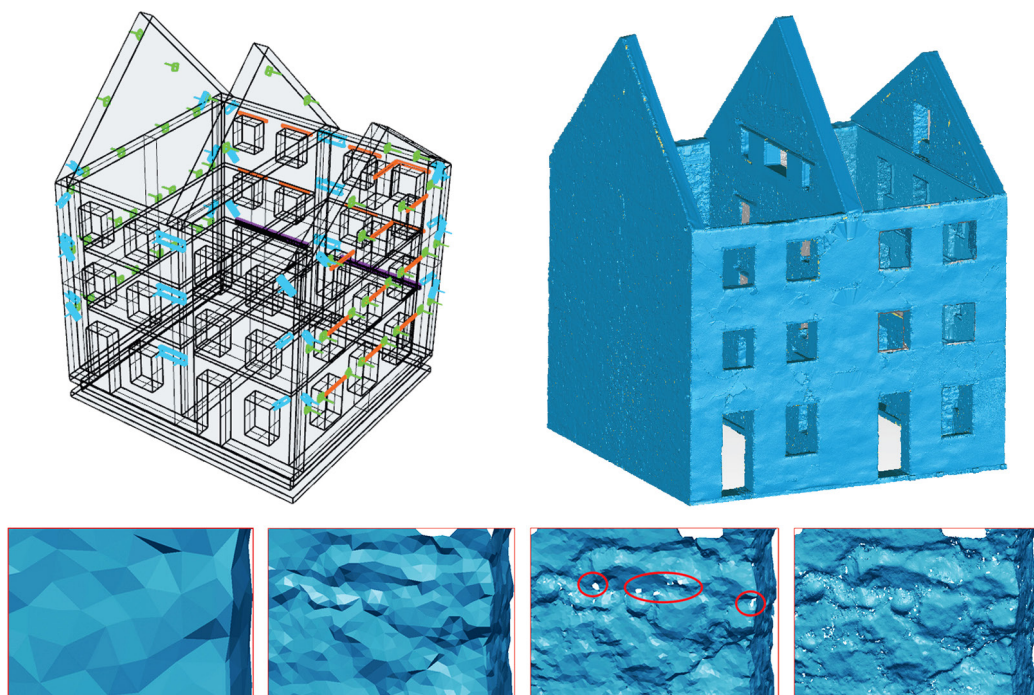



Fig. 07. Valutazione del dettaglio morfologico mesh per la diagnostica di cinematismi strutturali tra fasi post-sismiche di una struttura in muratura. Caso studio del monitoraggio sismico su prototipo edilizio sperimentale del centro storico di Basilea, Svizzera, realizzato presso il laboratorio di Fondazione EUCENTRE, Pavia. (Fonte: R. De Marco).

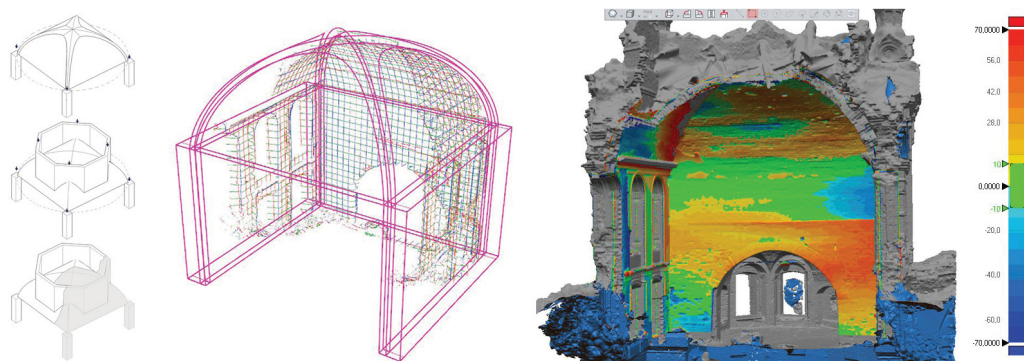



Fig. 08. Processing del modello reality-based per la ricostruzione ed il confronto tra struttura progettuale e struttura reale, e la mappatura delle condizioni di deformazione. Caso studio della Church of Annunciation in Pokcha, Russia. (Fonte: R. De Marco).

Manipolare la maglia: il *geometry processing* applicato al Modello strutturale 3D

L'applicazione della teoria del *pattern* alla gestione delle superfici 3D centra il processo geometrico sull'istituzionalizzazione di facce e vertici di forma per orientare la qualità del disegno strutturale. In primo luogo, la generazione della maglia *mesh* e delle superfici è associata alle condizioni di affidabilità e tolleranza di deviazione della struttura digitale rispetto al dato discontinuo del database metrico, mantenuto come riferimento *reality-based* al rilievo digitale. In alternativa alla triangolazione automatica delle nuvole di punti, è possibile impiegare algoritmi di estrazione semi-automatizzati che, attraverso l'impostazione di soglie di tolleranza, permettono di ottenere altrettanto rapidamente superfici poligonali controllate. Attraverso il riconoscimento della distribuzione superficiale dei punti discreti, con operazioni *multi-pick* o di interpolazione media per area, è possibile sviluppare superfici adattive rispetto alle nuvole di punti *multi-source* del rilievo. Il disegnatore può mantenere un controllo costante sulla qualità metrica del risultato, discretizzandolo e monitorando lo scostamento locale e la distribuzione dei punti per devianza tra il dato misurato ed il modello estratto, ricalibrando dove necessario le condizioni locali (fig. 09). Successivamente, la tipologia, numero e densità del modulo poligonale subentrano nel determinare non solo la conservazione di fattori geometrici caratteristici della forma strutturale (particolarità geometriche, lesioni, deformazioni), ma la stessa generazione di singolarità computazionali nel duplicato digitale. Il coordinamento tra poligoni, la proporzione reciproca e la connessione all'interno e al contorno della maglia determinano particolarità grafiche che corrispondono a specifiche articolazioni e nodi strutturali del lessico computazionale. La loro conformazione o alterazione rispetto alla continuità della maglia può condizionare la simulazione di vincoli statici e direttrici di sforzo della struttura, fino a condurre a paradossi virtuali rispetto al riferimento architettonico (figg. 10, 11). L'azione di *retolopogy* si attesta in tal modo come un passaggio necessario nell'ottimizzazione della maglia. L'iterazione permessa dai suoi algoritmi decreta la certificazione di una *mesh* "0" come trasposizione affidabile del sistema morfologico. La molteplicità delle iterazioni applicabili (come *quad-remesh*, *poly-fixing*, decimazione, solidificazione) consente di calibrare la caratterizzazione del modulo *poly* (*block, smooth, sharp, voxel*). accordando il modello 3D alle diverse esigenze espresse nel panorama dei calcolatori virtuali. Un'opportunità ad alta adattività anche per modelli ibridi di differente applicazione primaria, come geometrie architettoniche NURBS o elementi *shape* urbani da ambienti GIS 3D, per i quali la conversione ed ottimizzazione *mesh* individua percorsi di resilienza del processo di modellazione *reality-based*. Rimane in trattazione l'effettiva convenienza del modello *mesh* come strumento di inter-scambio dell'informazione morfologica dal *database* metrico, a fronte dei necessari processi di affinamento topologico. Se la simulazione di calcolo richiede necessariamente la gestione per moduli o Elementi Finiti del modello, ai quali associare "nodi" meccanici di controllo, è anche vero che la maggior parte delle piattaforme FEM ad oggi possiede già *tools* autonomi (seppur basici) di auto-generazione delle maglie *mesh* da primitive geometriche. Nell'applicazione FEA, la topologia geometrica delle *mesh* 3D trova tuttavia un diretto riscontro nell'interpretazione delle maglie come *Plates*, unità a diretta caratterizzazione di proprietà fisico-meccaniche: una condizione preferenziale rispetto all'importazione di sole istanze geometriche, quali quelle NURBS, dove l'approssimazione morfologica resta al contorno delle primitive di bordo e affidata alle capacità e variabilità di *reverse modelling* compiuta dal calcolatore (fig. 12).

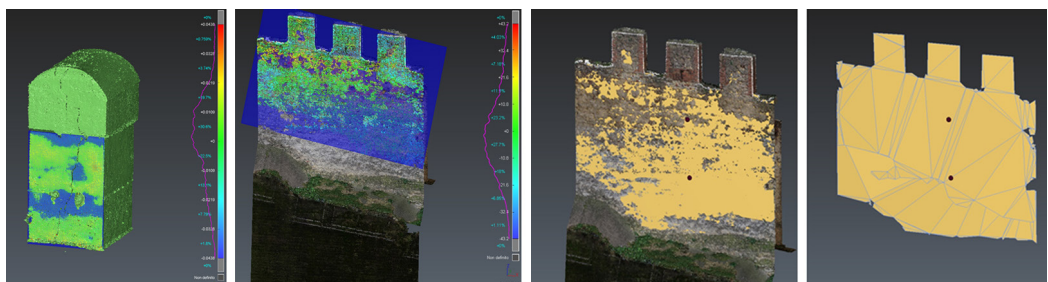



Fig. 09. Applicazione di algoritmi di mappatura della deviazione media per l'estrazione di superfici mesh in condizioni strutturali ad elevata deformazione. Caso studio del tratto di cinta magistrale scaligera presso il sistema fortificato di Verona, Italia. (Fonte: R. De Marco).

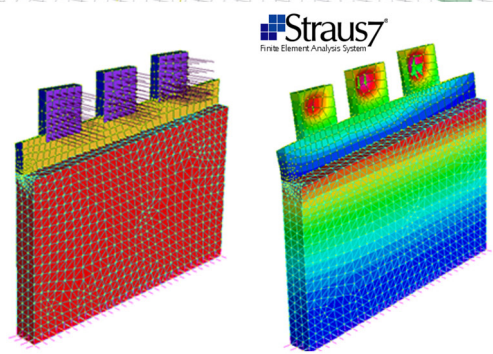
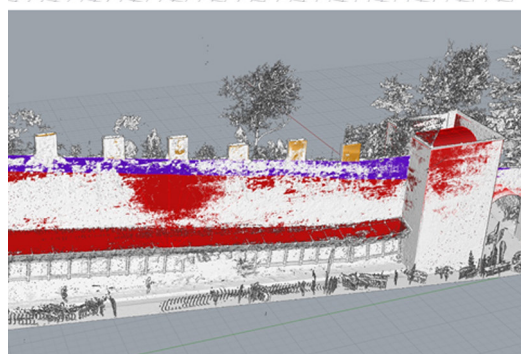
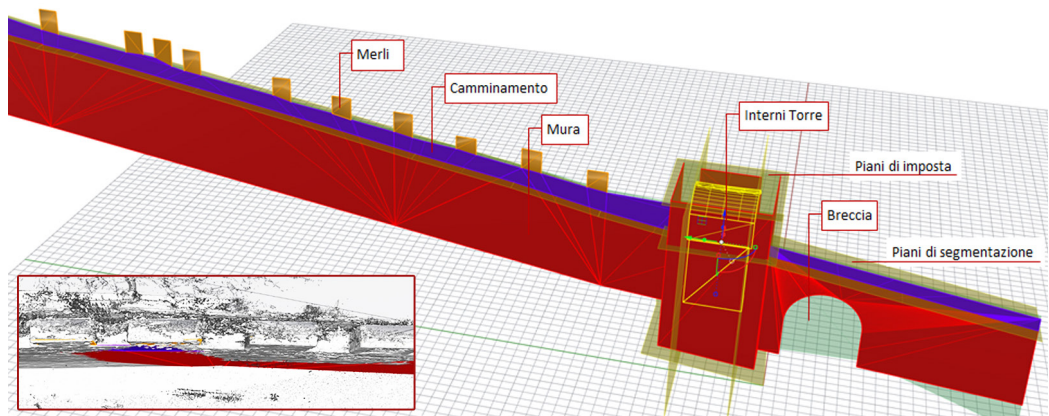



Fig. 10. Calibrazione della segmentazione e dell'aderenza metrica per la simulazione affidabile di strutture murarie storiche. Caso studio del tratto di cinta magistrale scaligera presso il sistema fortificato di Verona, Italia, sviluppato in collaborazione con Prof. P. Venini (DICAr, Università di Pavia). (Fonte: R. De Marco, P. Venini).

Fig. 11. Processi di feature-based recognition applicato a regioni superficiali mesh per la mappatura del danno strutturale post-sisma su murature storiche. Caso studio della Chiesa di San Giovanni a Campli, Teramo. (Fonte: R. De Marco).

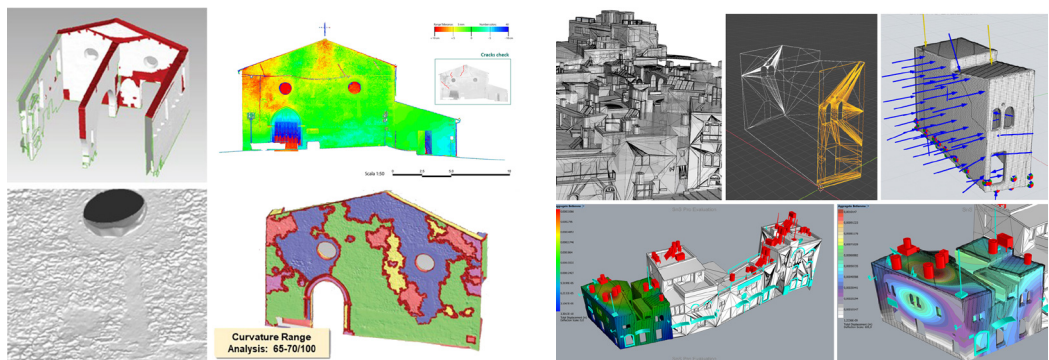



Fig. 12. Conversione solida per moduli voxel di superfici mesh da procedura semi-automatizzata alla scala del rilievo urbano. Simulazione di sollecitazione statica applicata ad unità edilizia di aggregato storico urbano. Caso studio del quartiere di Al-Anatreh presso il centro storico di Betlemme, Palestina. (Fonte: R. De Marco).

Simulazione Visuale programmata e nuove "intelligenze" del Disegno Strutturale

Il discorso sulle modalità di espressione e modellazione della forma ha condotto il rapporto tra strutture "reali" e "virtuali" nella pratica del disegno assistito, focalizzando come la grammatica dei linguaggi digitali possa non solo riscrivere, ma anche specificare nuove entità e moduli di trasposizione per superfici e forme.
Nella traduzione al formato *bit*, disegno ed algoritmo tendono ad uniformare il proprio codice genetico in "topologie digitali" ed in tale spazio di interazione si aprono opportune dimensioni dove questi sistemi possono dialogare ed integrare a doppio senso i rispettivi metadati. Mentre la modellazione *mesh reality-based* ha instaurato un processo di connessione dall'istanza grafica al parametro numerico, i recenti protocolli per *script* di *Visual Programming Languages* (VPL) introducono il verso opposto di manipolazione di istanze algoritmiche (meccanicamente significative) per la generazione di morfologie strutturali. Il disegno viene esplicitato per *box* visuali assegnati a ciascun dato sorgente (forma, materiale, schema di carico, temporalità) e azione applicata (associazione algoritmica, condizione di risultato richiesta, modalità di visualizzazione associata).

L'elemento *mesh* è adottato come parametro all'interno di relazioni a grafo logicamente strutturate tra componenti, sets e processi, che oltre a esplicitare le componenti del rilievo ampliano le sorgenti dei dati di documentazione, integrando *web platforms* e *open data* alle diverse scale di analisi. La definizione di domini materici e quadri tensionali può essere impostata a priori dell'elaborazione formale: da un lato diviene criterio di controllo della compatibilità topologica del modello alle condizioni meccaniche di analisi, dall'altro instaura un ambiente fluido di simulazione programmata della forma.
La struttura digitale diviene così un sistema di alter-strutture computazionali, dove i quadri di simulazione, resi "intelligenti" dalla corrispondenza degli *script*, sono elevati alla potenza delle componenti di informazione e relazione applicabili alla morfologia *reality-based.* Un'automazione estesa alla pari della consapevolezza del disegnatore su ciascun parametro che governi il disegno visuale, anticipando un principio di ordine e replicabilità per LoD (*Levels of Details*) e LoK (*Levels of Knowledge*) che proietta la topologia del modello mesh verso nuove sperimentazioni di coordinamento al *Building Information Modelling*.

Note

[1] Il termine 'struttura' indirizza una declinazione di valenza logica-estetica-comportamentale in architettura e ingegneria [Bianconi F. (2005). Segni digitali. Sull'interpretazione e il significato della tecnologia digitale per la conservazione dei beni culturali. Perugia: Morlacchi Editore, p. 43]. Con 'struttura', si identifica un sistema organizzativo, sia formale che finalistico, di elementi relazionati tra loro, ad assolvere una primaria funzione resistente nella fisicità materica dell'opera. Chiave di interpretazione della fenomenologia statica è la ricerca di riconoscibilità della 'struttura' a partire dall'inviluppo della fabbrica costruita, definibile sulla garanzia di parametri di invariabilità del sistema-base che si conservano nonostante la mutevolezza formale consentita dalla tecnologia edilizia [Tagliaventi 1996, pp. 11-12].

[2] Connubio storico evolutosi nel tempo con le richieste di interdisciplinarità delle professioni specializzanti di Ingegnere e Architetto, ma ancora non sufficientemente superato. Viene rimarcata una quasi ostinata divisione interprofessionale tra Sapere Teorico, semplificato alla previsione ideale e protetto dal confronto con l'imperfetta realtà, e Sapere Pratico, dettagliato dall'esperienza diretta del contesto edilizio in confronto alle topologie istituite per la computazione.

[3] La definizione di strutture gerarchiche sulla complessità spaziale-costruttiva rimane alla base sia della pratica teorica conoscitiva attraverso il disegno che mutuata dai programmi digitali di calcolo, instaurando relazioni dinamiche tra le entità/dati. Il primo livello di scomposizione richiesto riguarda la differenza tra primitive (primitiva), instance (esempio), object (oggetto) e class (classe). La primitiva rappresenta l'unità del modello, mentre l'instance deriva dalla sua manipolazione geometrica e parametrica per adattarla alla specifica conformazione dell'oggetto [Saggio 2004].

[4] I significati assegnati al termine 'forma' sono molteplici, spesso legati a sfumature puramente linguistiche. Arnheim, in particolare, individua la duplice accezione di 'shape' e 'form': la prima con valenza di 'configurazione', legata alle caratteristiche preminenti di un oggetto, già appartenenti ad un processo di semantizzazione; la seconda come 'forma', dove il collegamento all'identità dell'oggetto è relazionato ad aspetti di matericità, concretezza della struttura, orientamento ed espressione [Arnheim 1965, pp. 55-92, 93-141].

[5] L'idea della scomponibilità della raffigurazione della forma in un fascio di variabili, manipolabili per interazione astrattiva rispetto al loro effetto sul contenuto semantico, è definita su scala di iconicità. Tale scala fissa i suoi estremi ponendo al primo posto (per l'alto grado d'iconicità) l'oggetto reale, e all'estremo opposto la parola che designa l'oggetto, come il più alto grado di astrazione. In posizione intermedia, è collocata una serie di valori controbilanciati al tempo stesso tra iconicità decrescente ed astrazione crescente, tra i quali figurano campi come colore, grana, dimensione, orientamento, valore e forma. Per una trattazione completa, cfr. Bertin J. (1970). Le graphique. In Communications, 15, 1970, monografico sul tema "L'analyse des images".

Crediti

Le attività di ricerca dalle quali derivano le sperimentazioni presentate nelle immagini, rientrano in progetti di ricerca sviluppati nel Laboratorio DAda-LAB dell'Università di Pavia (responsabile prof. Sandro Parrinello). In particolare: "Rilievo 3D per l'analisi morfologica ed il monitoraggio delle deformazioni plastiche della Torre dell'Orologio dell'Università degli Studi di Pavia"; "Architectural documentation and 3D laser scanner survey of Al-Jazzar Mosque in Acre, Israel"; "3D Survey and Documentation for Seismic assessment of natural stone masonry buildings in Basel, Switzerland"; EU Horizon 2020-R&I-RISE-Research & Innovation Staff Exchange Marie SkŁodowska-Curie Action "PROMETHEUS"; "Indagini conoscitive per la cinta magistrale tra Castel S. Pietro e Castel S. Felice a Verona"; "Fast Survey per il monitoraggio e la gestione delle chiese colpite da sisma nella provincia di Teramo"; "3D Bethlehem - Sistema di Gestione e controllo della crescita urbana per lo sviluppo del patrimonio e il miglioramento della vita nella città di Betlemme"

Riferimenti bibliografici

Arnheim, R. (1965). *Arte e percezione visiva*. Milano: Feltrinelli.

Bertocci, S., Minutoli, G., Pancani, G. (2015). Rilievo tridimensionale e analisi dei dissesti della Pieve di Romena. In *DisegnareCon,* n. 8/14, pp. 26.1-26.20.

Bevilacqua, M. G., et al. (2017). Rilievi integrati per l'analisi dei dissesti strutturali del Battistero di San Giovanni a Pisa. In A. Di Luggo, et al. (a cura di). *Territori e Frontiere della Rappresentazione*. Atti del 39° Convegno UID. Napoli, 14-16 Settembre 2017, pp. 733-740. Roma: Gangemi Editore.

Bianconi, F. (2005). *Segni digitali. Sull'interpretazione e il significato della tecnologia digitale per la conservazione dei beni culturali.* Perugia: Morlacchi Editore, p. 43.

De Marco, R., Parrinello, S. (2021). Management of mesh features in 3D reality-based polygonal models to support non-invasive structural diagnosis and emergency analysis in the context of earthquake heritage in Italy. In *Int. Arch. Photogramm.* Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-M-1-2021, pp. 173–180.

Guarnieri, A., Milan, N., Vettore, A. (2013). Monitoring Of Complex Structure for Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry. In *International Journal of Architectural Heritage*, n. 7(1), pp. 54-67.

La Russa, F. M., et al. (2022). An expeditious parametric approach for City Information Modeling and Finite Element Analysis. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, pp. 307–314.

Parrinello, S. (2021). The development of information systems for the construction of digital historical centers, the case study of Bethlehem. In *AIP Conference Proceedings,* n. 2428
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0071467> (consultato il 6 marzo 2022).

Parrinello, S., De Marco, R. (2018). Dal rilievo al modello: la trasposizione grafica dell'evento sismico. In *Disegnare Idee Immagini,* n. 57, p. 70-81.

Parrinello, S., Dell'Amico, A. (2021). From Survey to Parametric Models: HBIM Systems for Enrichment of Cultural Heritage Management. In Bolognesi, C., Villa, D., (a cura di). *From Building Information Modelling to Mixed Reality*, pp. 89-107. Cham: Springer.

Saggio, A. (2004). Modello. Verso una logica della simulazione. In Migliari, R., (a cura di). *Disegno come Modello,* pp. 66-70. Roma: Edizioni Kappa.

Stanga, C., et al. (2021). Extending 3D quality modelling for earthquake-damaged stone masonry wall: combined digital models for building archaeology. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* XLVI-M-1-2021, pp. 721–728.

Tagliaventi, G. (1996). *Morfologia strutturale dell'architettura*. Forma, materia, spazio, caratteri, tecnologia. Roma: Gangemi.

Vernizzi, C. (2007). Considerazioni sul rilevamento per la valutazione strutturale: le volte della navata centrale del Duomo di Parma. In *Disegnare Idee Immagini,* n. 35, pp. 74-85.

Autore
Raffaella De Marco, DICAr Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia, raffaella.demarco@unipv.it

Per citare questo capitolo: De Marco Raffaella (2022). La Forma strutturale: opportunità di articolazione topologica delle mesh geometriche al processo di conoscenza e simulazione in Architettura/ The Structural Form: opportunities for a topological articulation of geometric meshes to the process of knowledge and simulation in Architecture. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp. 2324-2343.

Isbn 9788835141938

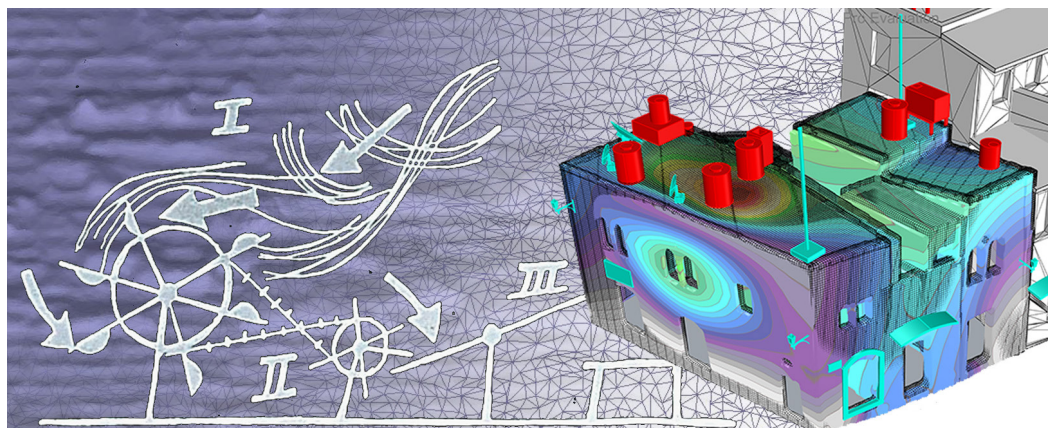
The Structural Form: opportunities for a topological articulation of geometric meshes to the process of knowledge and simulation in Architecture

Raffaella De Marco

Abstract

The adoption of reliable reality-based models for structural analysis and simulation faces a trans-sectoral scientific debate. The need for numerical correspondence between form and mechanics required by the Science of Constructions, predominantly oriented towards formal synthesis, finds a debated level of confrontation with the Science of Drawing and its digital practices. At the centre, the topic of form and the adaptation of geometry processing conditions to the morphology of architecture, to specify the association of numerical, static-mechanical, and simulation meanings. A process that highlights the management of the mesh module as a simple geometric unit, at the same time discrete and continuous, adaptable to fluid articulations and parametric-informative relationships. Both semiotically and technologically, digital graphics allow experimentation with the geometric data of structures that join signs and parameters into updated visual definitions of drawing languages. In addition to an enhanced adherence between real form and virtual structure, the control of drawing units in algorithmic terms is affirmed, reinforcing the reciprocal genesis between representation and computation. Through experiments conducted on international case studies involving the Historical Built Heritage, the control processes on the 3D mesh structural model are analysed. The specific adaptive variables of such models are compared to guarantee the reliability and testing of digital prototypes, orienting the language of representation for interdisciplinary applications.

Keywords
Structural drawing, digital morphology, geometry processing, mesh models, structural simulation

Topic
Simulare

Mechanics and structure represented through “agents” of form. “Sketch” by Paul Klee (Source: Web), and static stress processing in the 3D model of a traditional hosh in Bethlehem’s Old Town (Source: R. De Marco).

doi.org/10.3280/oa-832-c146

Structure and Form: an introduction to the graphic experience

The representation of structures in architecture [1], historically influenced by the convergence of Science and Technique [2], frames an application of Drawing practices well oriented towards the needs of a quantitative investigation of form, inherent to the world of mechanics. It defines an analysis objective projected beyond the statics of the morphological system, which requires a method to integrate the graphic models with both physical-material and temporal properties useful for the dynamic simulation of structural stresses. The interpretation of the architectural structure as a mechanical system has increased a representative logic for instances [3], such as components and constraints, to facilitate the physical connection of the parts and the interpretation of the variables. Structural models have undergone an abstraction of form, often losing recognisability from the real system towards a rigorous but unrealistic schematisation in ideal beams and blocks. (fig. 01)
This process, however, has no basis in the developments achieved by research in the field of digital surveying, which is increasingly refined to guarantee, in a non-invasive way, high degrees of resolution and measurement density. It is precisely the relationship between Reality and Abstraction that is at the basis of the handling of methods and products for structural analysis, conceptually unbalanced on the formal idealisation of architectural apparatuses. To the spontaneity of sketches and figurative schemes linked to construction and building technical codes, a geometric regularisation of the structural drawing was introduced "a priori" to the phenomenal experience. The exaltation of proportions and regularities, with the categorisation of predetermined formal modules, set up an absolute rational aesthetic in mechanical representation, reinforcing the diffusion of graphic codes and manuals for a prevalent signical taxonomy of structural drawing.

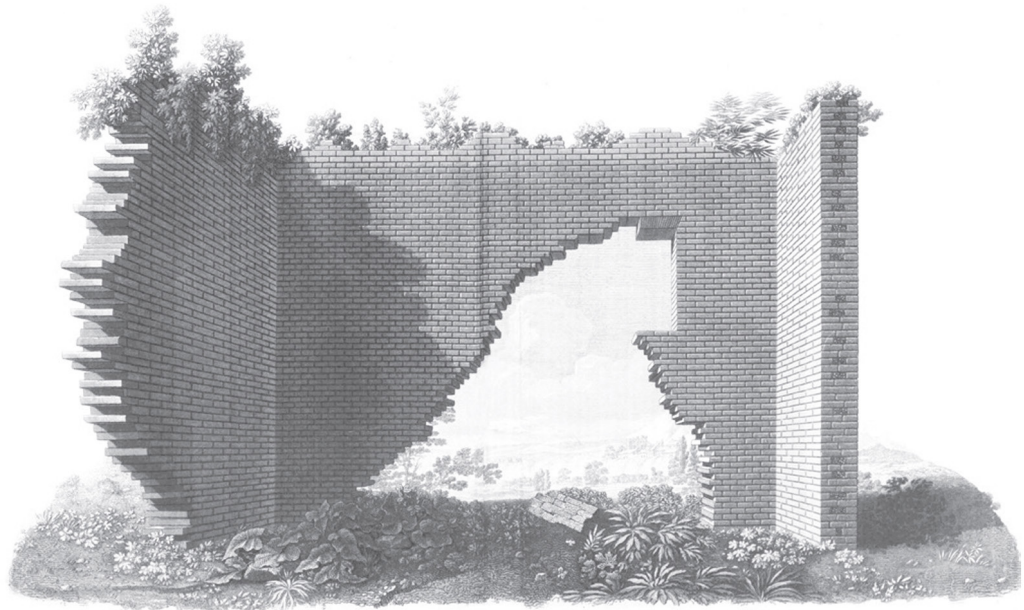
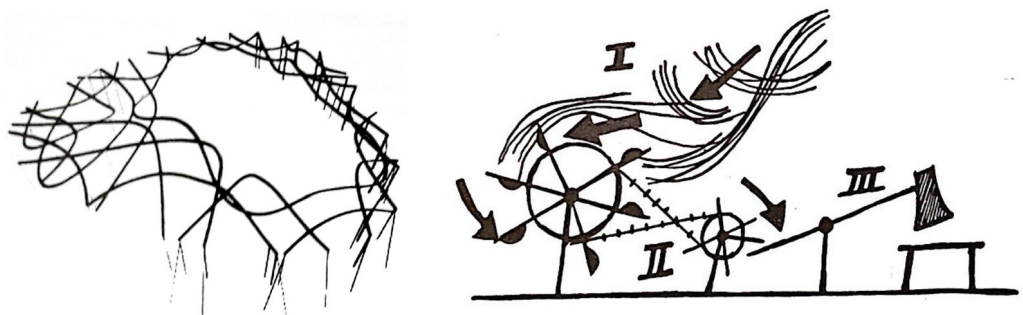



Fig. 01. Levels of interpretation and manipulation for a visual definition of the architectural structural system. From above: Jean-Baptiste Rondelet, a formal variation that preserves the continuity of stress behaviors, from Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir, 1802; Ove Arup, "Actar Arquitectura – Telecommunications Tower on the Turò de la Rovira, structural diagram, Barcellona, 2001; Paul Klee, "Sketch", mechanical functions and organs of an air mill structure, 1930. (Source: Web).

The reproduced structures have been reduced to skeletal apparatuses, "scarce" of formal specificity, omitted of the complex but real morphological imperfection as the static identity of the system. The visual knowledge of the architectural structure has consolidated the idea of systematic matrices, useful to the building process, which have been taken to extremes concerning the traditional codes inherited from the academies and from ornamental drawing (figg. 02, 03).
A renouncement of the detailed characters of the drawing that has arranged the assumption of the graphic role to vectorial and primitive components for the synthesis of the form: the "line", directional and constitutive element, and the "point", connective bond and bi-univocal articulation. This formal simplification has been well suited to Digital Drawing in supporting the processing of computational systems, such as Finite Element calculation codes. This has happened at the expense of forcing the potentialities of Representation, of the digital survey, and the detailed databases from close-range acquisition, on processes of simplification that therefore appear iconic, almost significant (fig. 04).

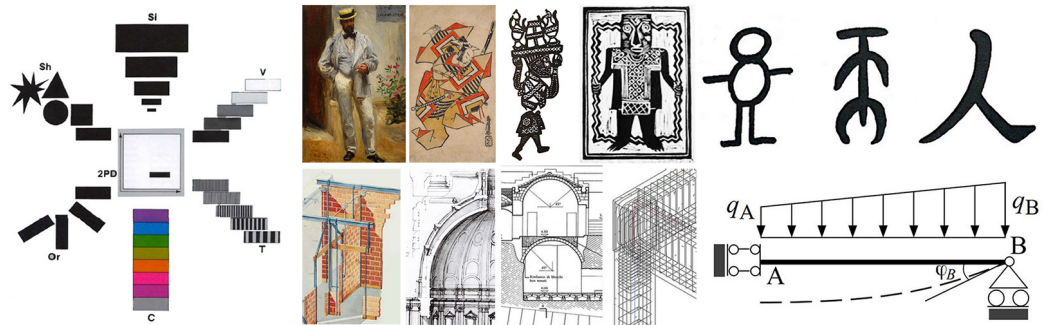



Fig. 02. Visual variables for the control of J. Bertin's sign processing (size, value, texture, color, orientation, and shape), and parallelism of application in representation between the human figure and the structural work. (Source: Web).

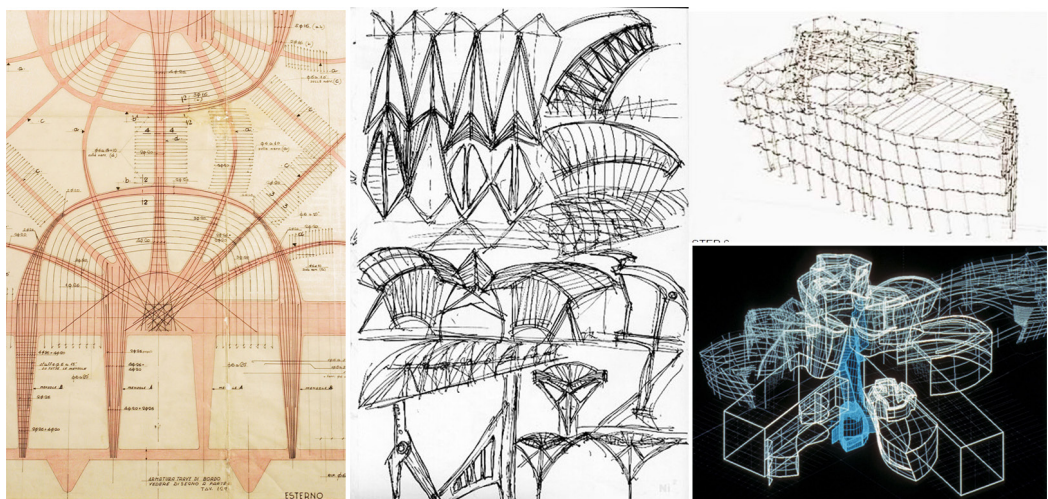



Fig. 03. Abstraction in structural drawing, from technical sketch to digital practice. From left: Pier Luigi Nervi, study details for complex structures, 1950; Santiago Calatrava (2001); Frank Gehry, design study of the Guggenheim Museum 3D on CATIA software, 1997. (Source: Web).

A "simple" form as a topological principle for structural representation

The concept of Form, applied to the documentation of historical structures in architecture, concentrates on the aptitude of Drawing on the mnemonic property of the material that underlies the analysis of the mechanical system. The perceptive process of reception and communication of the graphic message is thus recalled, at the basis of the entire discipline of Representation, which here intervenes between the direct observation of the static condition, through measurement and survey, and its communication for phenomenal interpretation. The Form is replaced by multiple possible meanings [4], each aimed at capturing a specific coherence of the graphic approach to the declination of the structural duplicate. The

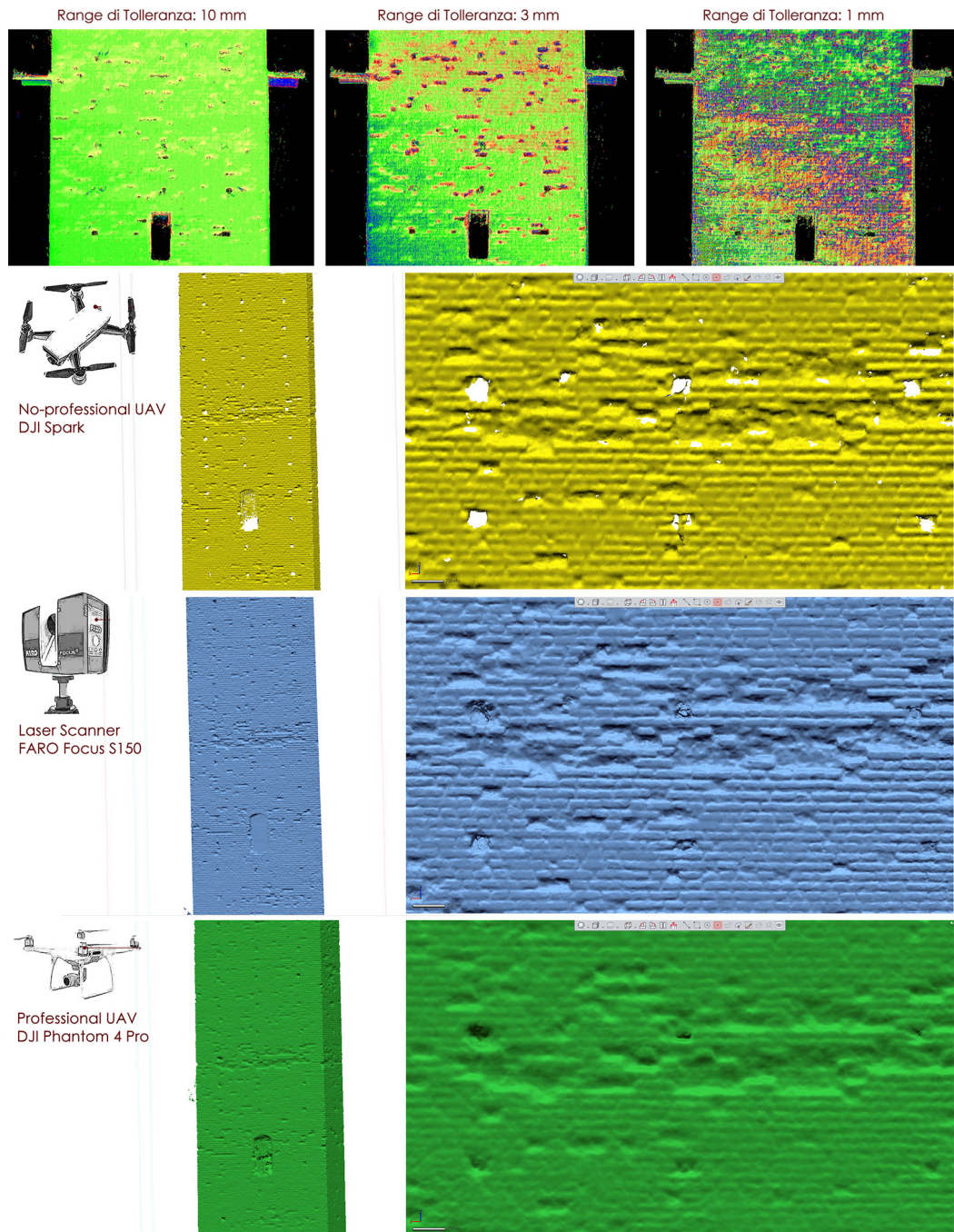



Fig. 04. Comparison of quality and morphological detail of 3D reality-based meshes in close-range multi-instrumental survey acquisition. Case study of the survey for the non-invasive documentation of the medieval Clock Tower at the University of Pavia. (Source: R. De Marco).

structural Form is assumed as "projectual", as a reference concerning its "plastic-dynamic" conditioning due to stress patterns. At the same time, it becomes "instantaneous-consecutive" as related to an act of acquisition in a temporary configuration in the experience of the architectural system, and "direct-indirect" concerning the protocols of investigation and processing of on-site observation and close-range instrumental survey. Concerning the modes of graphic transposition, the Structural Form is declared as "partial" or "total", for the conditions of segmentation and hierarchization of the components of the "drawn" structure concerning the "real" system. At the same time, it can be defined as "free" or "concatenated", for the relations of spatial, superficial, and boundary continuity to which it can be forced (or, on the contrary, freed) in the tracing of the material structural conditions and constraints.

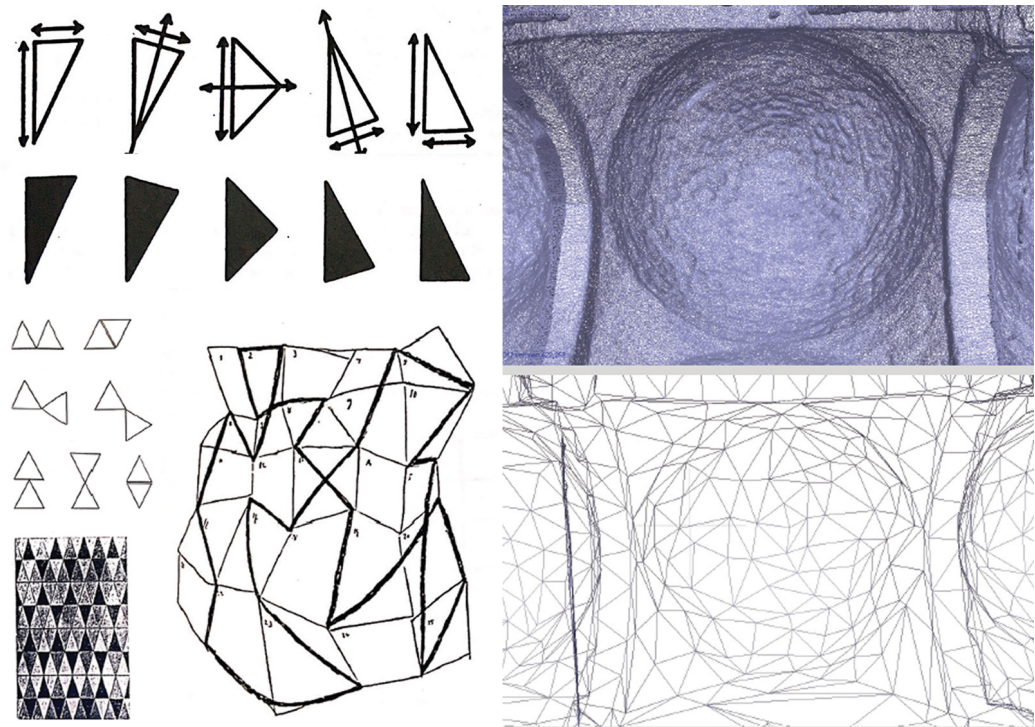



Fig. 05. From the application of poly modules to the development of complex grids to polygon density calibration for geometry processing applied to automatic mesh modeling of structural geometries. Case study of photogrammetric documentation for the restoration at the Al-Jazzar Mosque in Acre, Israel. (Source: R. De Marco).

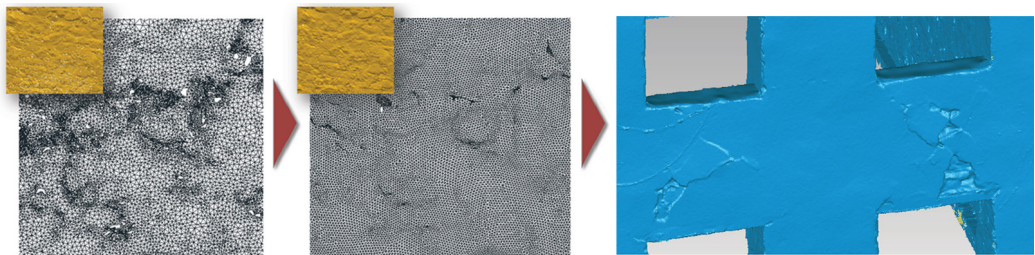



Fig. 06. Mesh density and order in the definition of morphological detail for the structural surface. Case study of seismic monitoring on an experimental building prototype in the historic center of Basel, Switzerland, carried out at the laboratory of the EUCENTRE Foundation, Pavia. (Source: R. De Marco).

As a collector of such multiplicities, the need for a hierarchical manipulation and management of the Structural Form for "simple" figures is reinforced, reducing the visual variables [5] to concentrate the contribution of mechanical meaning and introducing other dimensions of parameters and information (fig. 05). The polygonal geometric components, delimited by nodes and edges, prove to be compatible with both the numerical-mechanical association and the algorithmic bases underlying the tools of 3D Digital Representation. Mesh grids, patches, faces, and borders establish an updated lexicon of the visual product where the drawer can maintain a precise morphological knowledge of both the single topological modules and the significant unitary system: the digital architectural structure. In this way, the density of graphic information is prevented from presenting itself as an agglomeration of fragments, where details lose their meaning, and the unit becomes unrecognisable (fig. 06). The same system offers itself to sequential and consecutive mechanical conditions at the boundary: acting on the spatial characterisation of the single polygons and of the mesh as a whole, the physical dimension is simulated temporally, acting on the morphological qualities of the 3D drawing, fluidising the readability of simulated static conditions and the management of associated information. In this respect, the digital practice facilitates the management of such a plurality of mechanical conditions on the same graphic entity, connecting and ordering in analytical terms the structural geometries in the programming of the virtual space (fig. 07). The simplicity of the Form is based on the correspondence between modulus and pattern in the construction of the 3D model, to manipulate the surface (or solid) continuity to assume significant conditions in the virtual structure.

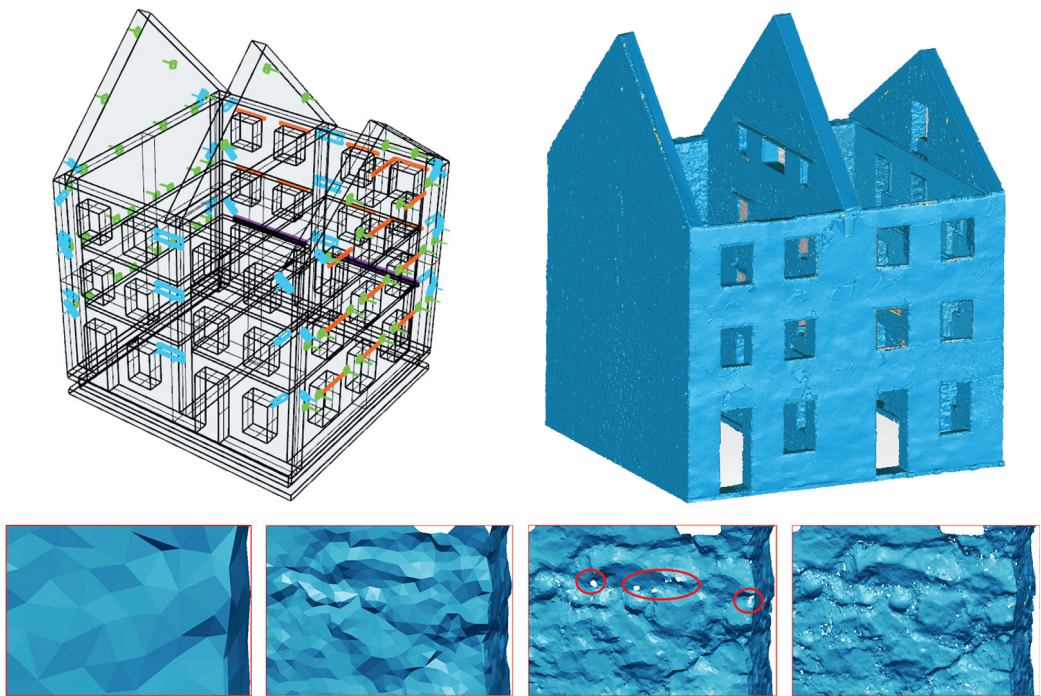



Fig. 07. Evaluation of morphological mesh detail for the diagnostics of structural kinematics between post-seismic phases of a masonry structure. Case study of seismic monitoring on an experimental building prototype of the historic centre of Basel, Switzerland, carried out at the laboratory of the EUCENTRE Foundation, Pavia. (Source: R. De Marco).

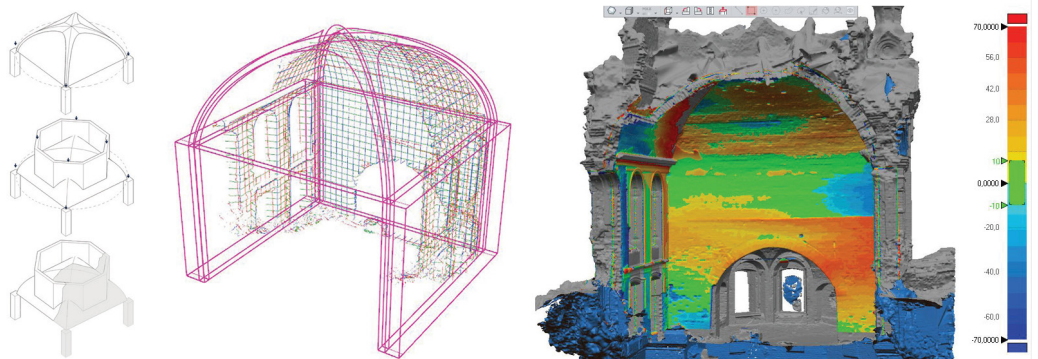
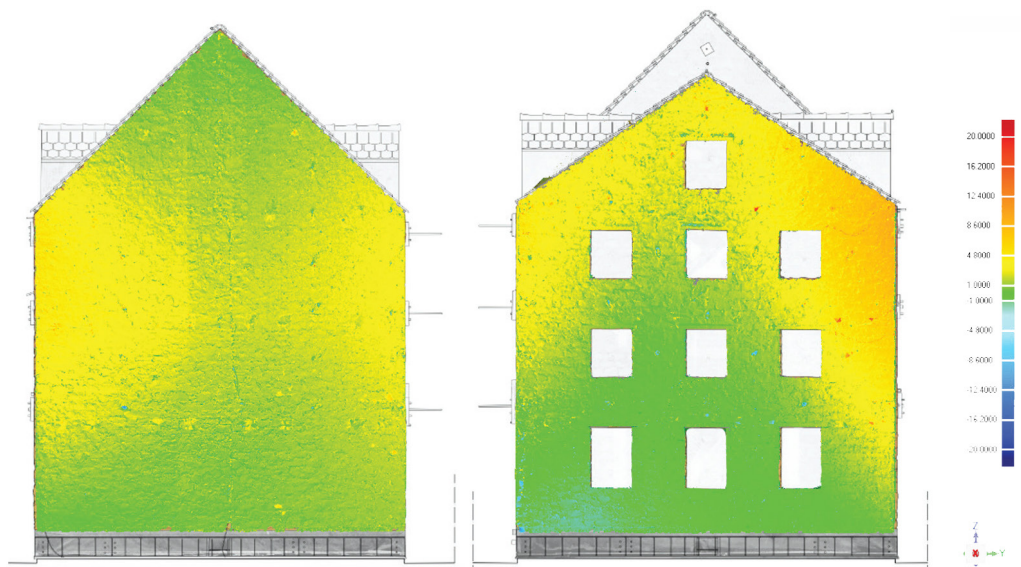



Fig. 08. Reality-based model processing for reconstruction and comparison of design and real structure, and mapping of deformation conditions. Case study of the Church of Annunciation in Pokcha, Russia. (Source: R. De Marco).

In this sense, topological research on 3D modelling with meshes becomes taxonomic for structural representation experiments, and the preservation of formal imperfection, in turn, becomes an epistemological requirement for applying reliable mechanical simulation processes to architecture (fig. 08).

Manipulating the mesh: the geometry processing applied to the 3D structural Model

The application of pattern theory to 3D surface management centres the geometric process on the institutionalisation of shape faces and vertices to guide the quality of the structural drawing. Firstly, the generation of the mesh and surfaces is associated with the reliability and deviation tolerance conditions of the digital structure concerning the discontinuous datum of the metric database, maintained as a reality-based reference to the digital survey.
As an alternative to the automatic triangulation of point clouds, semi-automated extraction algorithms can be used, which, through the setting of tolerance thresholds, make it possible to obtain controlled polygonal surfaces just as quickly. Through the recognition of the surface distribution of discrete points, with multi-pick or area-averaged interpolation operations, adaptive surfaces can be developed concerning the multi-source point clouds of the survey. The designer can maintain constant control over the metric quality of the result, discretizing it and monitoring the local deviation and distribution of points by deviation between the measured data and the extracted model, recalibrating the local conditions where necessary (fig. 09). Subsequently, the type, number and density of the polygonal module intervene in determining not only the conservation of geometric factors characteristic of the structural form (geometric particularities, lesions, deformations) but also the generation of computational singularities in the digital duplicate. The coordination between polygons, the reciprocal proportion and the connection within and around the mesh, determine graphic particularities that correspond to specific articulations and structural nodes of the computational lexicon. Their conformation or alteration concerning the continuity of the mesh can condition the simulation of static constraints and stress directions of the structure, to the point of leading to virtual paradoxes concerning the architectural reference (figg. 10, 11).
The action of retopology is thus attested as a necessary step in the optimisation of the mesh. The iteration allowed by its algorithms decrees the certification of a mesh "0" as a reliable transposition of the morphological system. The multiplicity of applicable iterations (such as quad-remesh, poly-fixing, decimation, solidification) makes it possible to calibrate the characterisation of the poly module (block, smooth, sharp, voxel) by tuning the 3D model to the various requirements expressed in the panorama of virtual computers.
It represents a highly adaptive opportunity also for hybrid models with a different primary application, such as NURBS architectural geometries or urban shape elements from 3D GIS environments, for which mesh conversion and optimisation identify resilience paths of the reality-based modelling process. The actual convenience of the mesh model as a tool for the interchange of morphological information from the metric database remains under discussion, in the face of the necessary topological refinement processes. If calculation simulation necessarily requires management by modules or Finite Elements of the model, to which "nodes" for mechanical control are associated, it is also true that most FEM platforms today

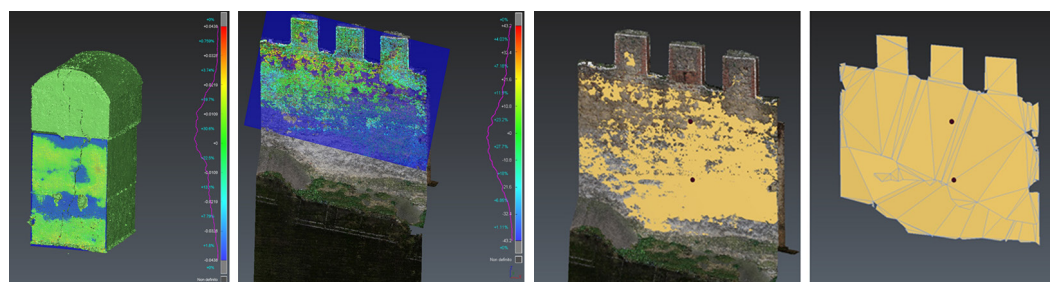



Fig. 09. Application of average deviation mapping algorithms for mesh surface extraction in highly deformed structural conditions. Case study of a portion of the Scaliger's walls of the fortified system of Verona, Italy. (Source: R. De Marco).

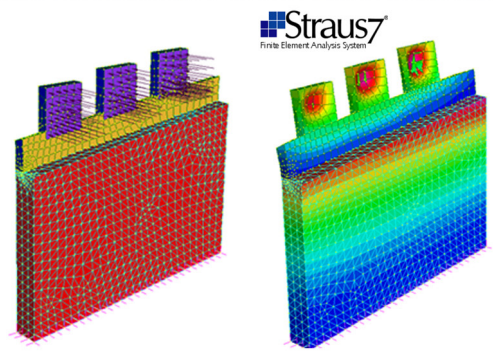
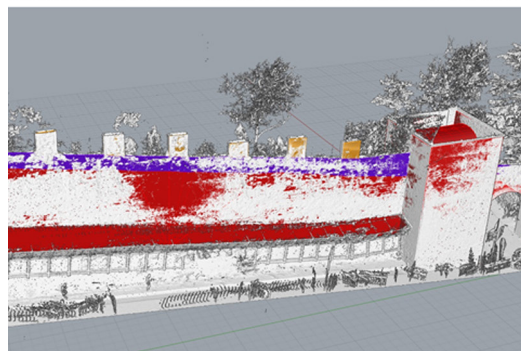
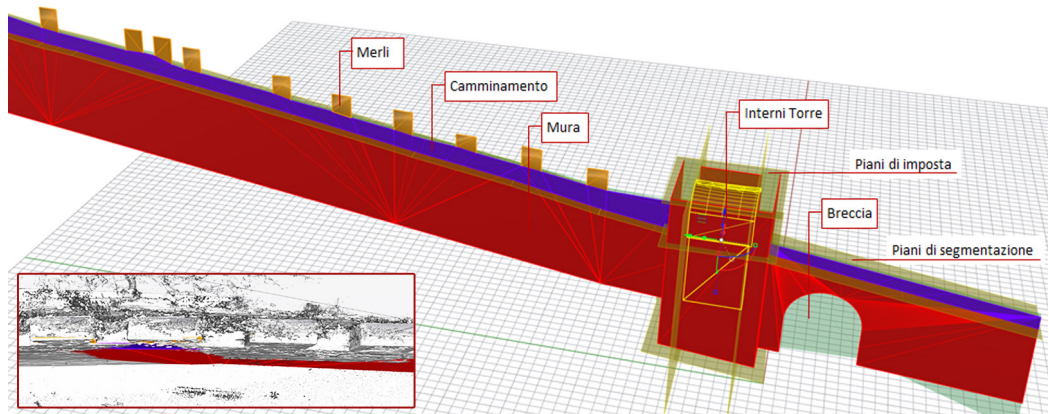



Fig. 10. Calibration of segmentation and metric adherence for reliable simulations on historical wall structures. Case study of a portion of the Scaliger's walls of the fortified system of Verona, Italy, developed in collaboration with Prof. P. Venini (DICAr, University of Pavia). (Source: R. De Marco, P. Venini).

Fig. 11. Feature-based recognition processes applied to mesh surface regions for post-earthquake structural damage mapping on historic masonry. Case study of the Church of San Giovanni in Campli, Teramo. (Source: R. De Marco).

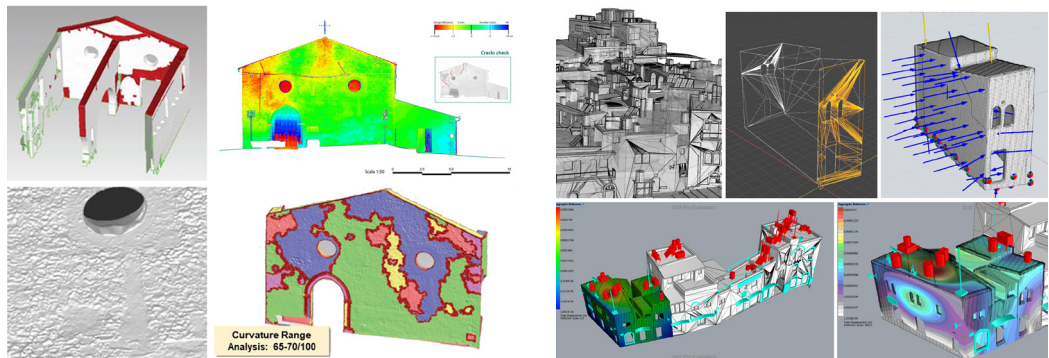



Fig. 12. Solid conversion for voxel modules of mesh surfaces from semi-automated procedure to urban survey scale. Static stress simulation applied to building units of urban historical aggregates. Case study of the Al-Anatreh neighborhood in the historic center of Bethlehem, Palestine. (Source: R. De Marco).

already possess autonomous (albeit basic) tools for the auto-generation of meshes from geometric primitives. In the FEA application, the geometric topology of the 3D meshes finds however a direct feedback in the interpretation of the meshes as Plates, units with a direct characterisation of physical-mechanical properties: a preferential condition concerning the importation of only geometric instances, such as the NURBS ones, where the morphological approximation remains at the border of the edge primitives, entrusted to the capacities and variability of reverse modelling performed by the computer (fig.12).

Programmed Visual Simulation and new "intelligences" of Structural Drawing

The discourse on the modes of expression and modelling of form has led to the relationship between "real" and "virtual" structures in the practice of assisted drawing, focusing on how the grammar of digital languages can not only rewrite but also specify new entities and transposition modules for surfaces and forms. In the translation to the bit format, drawing and algorithm tend to unify their genetic code in "digital topologies", and in this space of

interaction appropriate dimensions open up where these systems can dialogue and integrate their respective metadata in a two-way direction. While reality-based mesh modelling has established a process of connection from the graphical instance to the numerical parameter, recent Visual Programming Languages (VPL) script protocols introduce the opposite direction of manipulating algorithmic (but mechanically meaningful) instances for the generation of structural morphologies. The drawing is made explicit by visual boxes assigned to each source data (shape, material, loading pattern, temporality) and applied action (algorithmic association, required result condition, associated display mode). The mesh element is adopted as a parameter within graphical relationships logically structured between components, sets and processes, which in addition to explicating the components of the survey expand the sources of data documentation, integrating web platforms and open data at different scales of analysis. The definition of material domains and tension frameworks can be set prior to formal processing: on the one hand, it becomes a criterion for checking the topological compatibility of the model with the mechanical conditions of analysis, and on the other, it establishes a fluid environment of programmed simulation of form. The digital structure thus becomes a system of computational alter-structures, where the simulation frameworks, made "intelligent" by the correspondence of the scripts, are elevated to the power of the information and relation components applicable to reality-based morphology. A type of automation extended equally to the drawer's awareness of each parameter governing the visual drawing, anticipating a principle of order and replicability for LoD (Levels of Details) and LoK (Levels of Knowledge) that projects the topology of the mesh model towards new experiments in coordination with Building Information Modelling.

Notes

[1] The term 'structure' addresses a declination of logical-aesthetic-behavioural value in architecture and engineering [Bianconi F. (2005). *Segni digitali. Sull'interpretazione e il significato della tecnologia digitale per la conservazione dei beni culturali.* Perugia: Morlacchi Editore, p. 43]. As 'structure', we identify an organisational system, both formal and finalistic, of elements related to each other, to perform a primary resistant function in the material physicality of the architecture. The key to the interpretation of the static phenomenology is the search for recognisability of the 'structure' starting from the envelope of the built unit, which can be defined on parameters of invariability of the basic system that is preserved despite the formal mutability allowed by building technology [Tagliaventi 1996, pp. 11-12].

[2] This historical combination has evolved over time with the demands of interdisciplinarity of the specialised professions of Engineer and Architect but is still not sufficiently overcome. An almost obstinate interprofessional division is highlighted between Theoretical Knowledge, simplified to ideal prediction and protected by comparison with imperfect reality, and Practical Knowledge, detailed by direct experience of the building context in comparison with the topologies established for computation.

[3] The definition of hierarchical structures on spatial-constructive complexity remains at the basis of both cognitive theoretical practise through drawing and borrowed from digital calculation programs, establishing dynamic relationships between entities/data. The first level of decomposition required concerns the difference between "primitive", "instance", "object" and "class". The primitive represents the unit of the model, while the instance derives from its geometric and parametric manipulation to adapt it to the specific conformation of the object [Saggio 2004].

[4] The meanings assigned to the term 'form' are multiple, often linked to purely linguistic nuances. Arnheim, in particular, identifies the double meaning of 'shape' and 'form': the first with the value of 'configuration', linked to the pre-eminent characteristics of an object, already belonging to a process of semanticisation; the second as 'form', where the connection to the identity of the object is related to aspects of materiality, concreteness of structure, orientation and expression [Arnheim 1965, pp. 55-92, 93-141].

[5] The idea of the decomposability of the representation of form into a bundle of variables, manipulable by abstract interaction concerning their effect on the semantic content, is defined on a scale of iconicity. This scale fixes its extremes by placing the real object in the first place (for its high degree of iconicity) and at the opposite extreme the word that designates the object, as the highest degree of abstraction. In an intermediate position, a series of values are placed, balanced at the same time between decreasing iconicity and increasing abstraction, including fields such as colour, grain, size, orientation, value and form. For a complete discussion, see Bertin J. (1970). Le *graphique*. In *Communications,* 15, 1970, monograph on the theme "*L'analyse des images*".

Acknowledgments

The research activities related to the presented images are part of research projects developed within DAda-LAB Laboratory of the University of Pavia (responsible: prof. Sandro Parrinello). In particular: "3D survey for morphological analysis and plastic deformation monitoring of the Clock Tower at the University of Pavia"; "Architectural documentation and 3D laser scanner survey of Al-Jazzar Mosque in Acre, Israel"; "3D Survey and Documentation for Seismic assessment of natural stone masonry buildings in Basel, Switzerland"; EU Horizon 2020-R&I-RISE-Research & Innovation Staff Exchange Marie SkŁodowska-Curie Action "PROMETHEUS"; "Surveys for the Scaliger's walls between Castel S. Pietro and Castel S. Felice in Verona"; "Fast Survey for the monitoring and management of earthquake churches in Teramo"; "3D Bethlehem - Management and control of urban growth for the development of heritage and improvement of life in the city of Bethlehem".

References

Arnheim, R. (1965). *Arte e percezione visiva*. Milano: Feltrinelli.

Bertocci, S., Minutoli, G., Pancani, G. (2015). Rilievo tridimensionale e analisi dei dissesti della Pieve di Romena. In *DisegnareCon,* n. 8/14, pp. 26.1-26.20.

Bevilacqua, M. G., et al. (2017). Rilievi integrati per l'analisi dei dissesti strutturali del Battistero di San Giovanni a Pisa. In A. Di Luggo, et al. (a cura di). *Territori e Frontiere della Rappresentazione*. Atti del 39° Convegno UID. Napoli, 14-16 Settembre 2017, pp. 733-740. Roma: Gangemi Editore.

Bianconi, F. (2005). *Segni digitali. Sull'interpretazione e il significato della tecnologia digitale per la conservazione dei beni culturali.* Perugia: Morlacchi Editore, p. 43.

De Marco, R., Parrinello, S. (2021). Management of mesh features in 3D reality-based polygonal models to support non-invasive structural diagnosis and emergency analysis in the context of earthquake heritage in Italy. In *Int. Arch. Photogramm.* Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-M-1-2021, pp. 173–180.

Guarnieri, A., Milan, N., Vettore, A. (2013). Monitoring Of Complex Structure for Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry. In *International Journal of Architectural Heritage*, n. 7(1), pp. 54-67.

La Russa, F. M., et al. (2022). An expeditious parametric approach for City Information Modeling and Finite Element Analysis. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, pp. 307–314.

Parrinello, S. (2021). The development of information systems for the construction of digital historical centers, the case study of Bethlehem. In *AIP Conference Proceedings,* n. 2428
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0071467> (consultato il 6 marzo 2022).

Parrinello, S., De Marco, R. (2018). Dal rilievo al modello: la trasposizione grafica dell'evento sismico. In *Disegnare Idee Immagini,* n. 57, p. 70-81.

Parrinello, S., Dell'Amico, A. (2021). From Survey to Parametric Models: HBIM Systems for Enrichment of Cultural Heritage Management. In Bolognesi, C., Villa, D., (a cura di). *From Building Information Modelling to Mixed Reality*, pp. 89-107. Cham: Springer.

Saggio, A. (2004). Modello. Verso una logica della simulazione. In Migliari, R., (a cura di). *Disegno come Modello,* pp. 66-70. Roma: Edizioni Kappa.

Stanga, C., et al. (2021). Extending 3D quality modelling for earthquake-damaged stone masonry wall: combined digital models for building archaeology. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* XLVI-M-1-2021, pp. 721–728.

Tagliaventi, G. (1996). *Morfologia strutturale dell'architettura*. Forma, materia, spazio, caratteri, tecnologia. Roma: Gangemi.

Vernizzi, C. (2007). Considerazioni sul rilevamento per la valutazione strutturale: le volte della navata centrale del Duomo di Parma. In *Disegnare Idee Immagini,* n. 35, pp. 74-85.

Author
Raffaella De Marco, Università di Pavia, DICAr Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, raffaella.demarco@unipv.it

To cite this chapter: De Marco Raffaella (2022). La Forma strutturale: opportunità di articolazione topologica delle mesh geometriche al processo di conoscenza e simulazione in Architettura/ The Structural Form: opportunities for a topological articulation of geometric meshes to the process of knowledge and simulation in Architecture. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp. 2324-2343.

Isbn 9788835141938